

Robert SZUMSKI, Dariusz CZUŁEK

GŁÓWNY URZĄD MIAR,
ul. Elekoralna 2, 00-139 Warszawa

Modernizacja państwowego wzorca jednostki długości poprzez zastosowanie syntezy częstotliwości

Mgr inż. Robert SZUMSKI

Absolwent wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej na kierunku Elektrotechnika. Od 2003 roku pracownik Zakładu Długości i Kąta Głównego Urzędu Miar.



e-mail: robert.szumski@wp.pl

Mgr inż. Dariusz CZUŁEK

Absolwent wydziału Fizyki Technicznej Informatyki i Matematyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej na kierunku Fizyka Techniczna. Od 2002 roku pracownik Zakładu Długości i Kąta Głównego Urzędu Miar.



e-mail: dczulek@vp.pl

Streszczenie

W referacie omówiono definicje oraz metody praktycznej realizacji jednostki długości. Ponadto w referacie przedstawiono zmodernizowane stanowisko państwowego wzorca jednostki długości. W szczególności opisano budowę, zasadę działania oraz charakterystyki metrologiczne syntezy częstotliwości optycznych. W referacie przedstawiono również metodę obliczeniową oraz zaprezentowano wyniki przykładowych pomiarów przeprowadzonych na zmodernizowanym stanowisku państwowego wzorca jednostki długości.

Słowa kluczowe: państwowy wzorzec jednostki długości, mise en pratique, synteza częstotliwości optycznych.

Modernization of the national standard of length using frequency synthesizer

Abstract

The definition and methods for practical realization of the length unit provided by CIPM are described in the paper. The stabilized radiation sources of standard wavelengths used in the laboratory before the modernization are presented with a description of the iodine stabilized He-Ne laser. Moreover, the modernized station of the national standard of length is realized. The principle of operation, the construction, the method for measurement, metrological characteristic of the optical frequency synthesizer (a new generation of optical frequency standards – Nobel Prize for prof. Theodor W. Hänsch in the field of quantum physics in 2005) are described and presented in block diagrams and illustrations. The method for result calculations from the frequencies measured during calibration is also demonstrated with exemplary results of the measurements using the national standard of length. The validating measurements were carried out by comparison of the results of iodine stabilized He-Ne laser calibration with those obtained from another NMI during the international comparisons.

Keywords: national standard of length, mise en pratique, optical frequency comb.

1. Wprowadzenie

Poznanie procesów kwantowych zachodzących w atomie pozwoliło na zbudowanie urządzeń do uzyskania spójnego, monochromatycznego światła poprzez jego wzmocnienie (generację) przy wykorzystaniu zjawiska wymuszonej emisji promieniowania, które zachodzi w kryształach, złączach i w gazach. Urządzenia takie, jak np. lasery, działają na zasadzie w/w emisji. Zasada działania lasera opiera się na fakcie, że układ, który wykazuje „ujemną absorpcję” może być wykorzystany jako wzmacniacz lub generator światła. Zatem działanie lasera jest wywołane tzw. akcją laserową polegającą na wzbudzeniu (najczęściej w wyniku pochłaniania promieniowania pochodzącego z obcego źródła, czyli tzw. pompy) niektórych atomów lub jonów odpowiedniej substancji do wyższego metastabilnego poziomu energetycznego.

Proces ten nazywa się pompowaniem i pozwala na wyzwolenie energii w postaci kwantów spójnego promieniowania laserowego.

Rozwój techniki laserowej i nowe osiągnięcia w pomiarach częstotliwości optycznych otworzyły możliwość sformułowania nowej definicji metra. W 1983 r. na 17 Generalnej Konferencji Miar (CGPM) jeden metr określono jako długość drogi przebytej w próżni przez światło w czasie $1/299792458$ sekundy, a Międzynarodowy Komitet Miar (CIPM) ustalił rozszerzoną listę kwantowych źródeł promieniowania zalecanych do praktycznej - „mise en pratique” - realizacji nowej definicji. Lista ta zawiera zarówno promieniowania różnego typu laserów, jak i lamp spektralnych i jest sukcesywnie rozszerzana. Jako że nowa definicja metra nie wskazuje jasno na sposób wykonywania pomiarów długości, została ona uzupełniona przez CIPM o trzy metody praktycznej jej realizacji [1, 2, 3, 4]:

– wykorzystując długość drogi l , którą płaska fala elektromagnetyczna przebywa w próżni w czasie t , wyznaczaną ze związku:

$$l = c_0 \cdot t \quad (1)$$

gdzie: t – mierzony czas, c_0 – prędkość światła w próżni równa 299792458 m/s.

Metoda ta możliwa jest do zastosowania w pomiarach dużych odległości, np. odległości ziemi od księżyca.

– wykorzystując długość płaskiej fali elektromagnetycznej w próżni λ o częstotliwości f , wyznaczaną ze związku:

$$\lambda = \frac{c_0}{f} \quad (2)$$

gdzie: f – mierzona częstotliwość, c_0 – prędkość światła w próżni równa 299792458 m/s.

Metoda ta opiera się na pomiarze częstotliwości stabilnego źródła światła poprzez porównanie jej ze znacznie stabilniejszą częstotliwością generatora cezowego (za pomocą szeregu zdudnień), wykorzystywanego w praktycznej realizacji definicji sekundy, a następnie wyznaczeniu z zależności matematycznej długości fali, która może być użyta jako wzorcowa w pomiarach długości.

– wykorzystując promieniowania z listy zawartej we wspomnianym wcześniej zaleceniu CIPM, których podane długości fal lub częstotliwości mogą być stosowane do praktycznej realizacji w/w definicji.

Lista rekomendowanych źródeł promieniowania [3] zawiera ponad 40 pozycji, w których stabilizowane źródła promieniowania kwantowego, pozwalają uzyskać stabilną częstotliwość promieniowania (tym samym długość fali w próżni) w zakresie fal widzialnych np. $\lambda \approx 532$ nm – spektrum zielone $\lambda \approx 633$ nm – spektrum czerwone, aż do głębokiej podczerwieni $\lambda \approx 1542$ nm.

W Laboratorium Długości Zakładu Długości i Kąta GUM wykorzystywane są następujące stabilizowane źródła promieniowania:

- stabilizowany laser oparty na absorpcji w parze nasyconej jodu $^{127}\text{I}_2$, komponent a16, linia widmowa R(127) – o długości fali promieniowania $\lambda \approx 633$ nm (z wewnętrzną komórką jodową), mający zastosowanie przy wzorcowaniu głowic interferometrów laserowych,
- lampy spektralne kadmowe (^{86}Kr , ^{114}Cd) – o długości fali promieniowania w zakresie (450 ÷ 650) nm, mające zastosowanie jako wzorce w interferencyjnych pomiarach płytek wzorcowych, realizując tym samym przekazywanie jednostki długości zgodnie z łańcuchem spójności pomiarowej.

2. Państwowy wzorzec jednostki długości

W Głównym Urzędzie Miar, zgodnie z trzecią metodą praktycznej realizacji definicji metra, wykorzystywane jest wysoko stabilne promieniowanie lasera He-Ne stabilizowanego jodem „GUM1” [5]. Stabilność względna tego lasera wynosi $5 \cdot 10^{-11}$. Stabilizacja częstotliwości promieniowania lasera oparta jest na zjawisku absorpcji i wymuszonej emisji przez molekuly jodu $^{127}\text{I}_2$, dla linii widmowej R(127). Współdziałanie poszczególnych elementów lasera wraz z komórką jodową pozwala wygenerować promieniowanie z szeregiem stabilnych częstotliwości w zakresie długości fali w próżni około 633 nm, które odpowiadają strukturze subtelnej absorpcyjnej linii widmowej jodu $^{127}\text{I}_2$ R(127). Stabilizacja częstotliwości oparta jest na wprowadzeniu wolnozmienniej (ok. 1092 Hz) modulacji sygnału optycznego, a następnie demodulacji fazowej trzeciej harmonicznej tego sygnału po stronie odbiorczej i zastosowaniu stabilizacyjnej pętli sprzężenia zwrotnego PLL (najczęściej stosowanej) z wykonawczym elementem piezoelektrycznym.

W roku 2007 w Laboratorium Długości Zakładu Długości i Kąta GUM dokonano modernizacji stanowiska państwowego wzorca jednostki długości. Modernizacja polegała na zakupie syntezy częstotliwości optycznych, zwanego „femtosecond frequency comb”. Stanowisko to stanowi nową generację wzorców częstotliwości optycznych (nagroda Nobla dla prof. Theodora W. Hänscha z dziedziny fizyki kwantowej w 2005 r.).

Zmodernizowane stanowisko pomiarowe umożliwiło bezpośrednie odniesienie generowanego sygnału do częstotliwości wzorcowego zegara cezowego, a przez to bezpośrednią, zgodną z definicją i zaleceniami CIPM (metoda 2), realizację jednostki długości.

3. Budowa oraz zasada działania syntezy częstotliwości optycznych

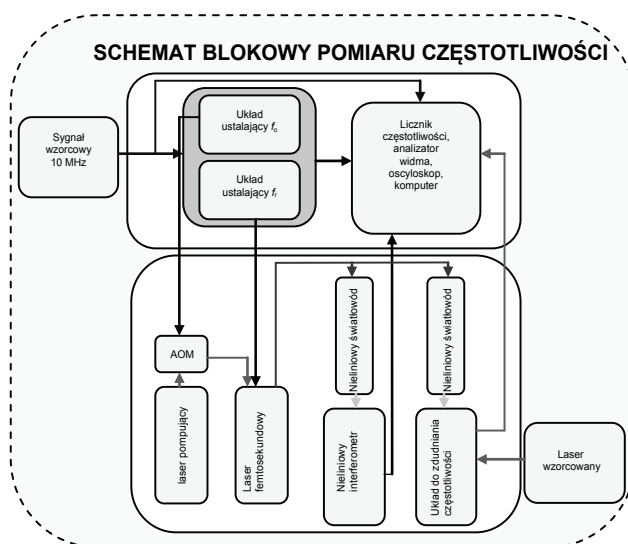
Układ pomiarowy, dzięki szerokiemu widmu (525 ÷ 1070) nm, które składa się z linii o dokładnie znanych częstotliwościach, umożliwia wzorcowanie laserów emitujących promieniowanie optyczne o różnych długościach fal [6]. Program komputerowy zapewnia pełną automatyzację oraz kontrolę stanowiska pomiarowego w trakcie trwania wzorcowania. Zsynchronizowanie stanowiska pomiarowego z wzorcowym sygnałem częstotliwości pozwala osiągnąć niepewność względną rzędu 10^{-13} .

Syntezer częstotliwości optycznych składa się z dwóch podstawowych części: układu optyczno-mechanicznego oraz zespołu elektronicznego.

Układ optyczno-mechaniczny składa się z lasera pompującego, modulatora amplitudy (AOM), lasera femtosekundowego (f_s), nieliniowych światłowodów, nieliniowego interferometru oraz układu pomiarowego służącego do zdudniania częstotliwości laserów wzorcowanych. Układ pomiarowy zapewnia kilka wyjść o różnych zakresach długości fal.

Układ elektroniczny składa się z analizatorów widma, oscyloskopu i licznika częstotliwości. Połączenie układu optyczno-mechanicznego z elektroniką przyrządu pomiarowego umożliwia ją fotodiody.

Na rysunku 1 przedstawiono schemat blokowy systemu pomiarowego.



Rys. 1. Schemat blokowy syntezy częstotliwości
Fig. 1. Block diagram of the femtosecond frequency comb

Poprawną pracę optycznego syntezy częstotliwości gwarantuje stabilizacja dwóch podstawowych parametrów:

- częstotliwości repetycji f_r ,
- częstotliwości offsetu f_o .

Dokładne wyznaczenie ich wartości umożliwia wyznaczenie wartości częstotliwości f_n dowolnego modu grzebienia częstotliwości z zależności:

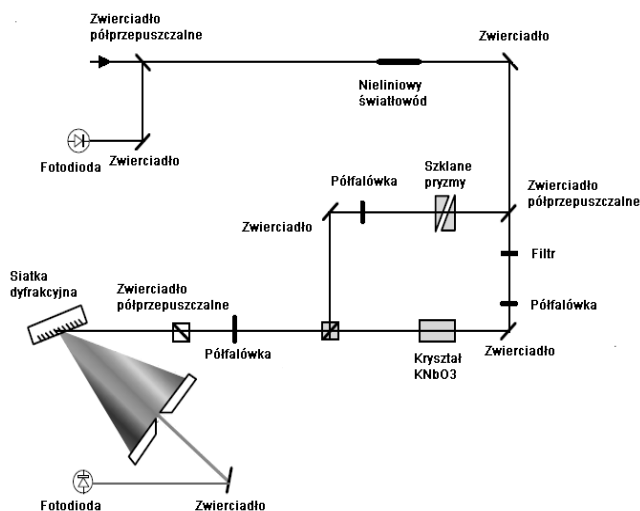
$$f_n = n \cdot f_r + f_o \quad (3)$$

gdzie: n – liczba całkowita, f_r – częstotliwość repetycji, f_n – częstotliwość n -tej linii syntezy częstotliwości.

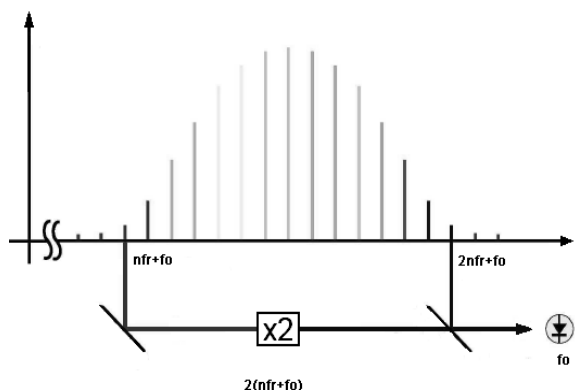
Poniżej (rys. 2) przedstawiono nieliniowy interferometr syntezy częstotliwości optycznych, za pomocą którego realizowana jest stabilizacja w/w parametrów.

Częstotliwość f_r jest wartością łatwo mierzalną, a jej typowe wartości mieszczą się w zakresie od 10 MHz do kilku GHz, w zależności od długości rezonatora lasera (w przypadku syntezy częstotliwości będącego własnością GUM częstotliwość f_r wynosi 202 MHz). Do pomiaru wartości częstotliwości repetycji lasera femtosekundowego użyto szybkiej fotodiody typu PIN. Ponadto cały układ elektroniczny jest zsynchronizowany z generowanym sygnałem częstotliwości wzorcowego zegara cezowego.

Częstotliwość f_o jest mierzona metodą zaproponowaną przez laureata nagrody Nobla T. W. Hänscha, polegającą na pomiarze sygnału zdudnienia.



Rys. 2. Schemat nieliniowego interferometru
Fig. 2. Schematic diagram of the nonlinear interferometer



Rys. 3. Widmo promieniowania syntezyera częstotliwości
Fig. 3. Frequency spectrum of the femtosecond frequency comb

Zgodnie z rys. 2 i 3 częstotliwość f_n modu o numerze n (barwa czerwona), opisana następującą zależnością:

$$f_n = n \cdot f_r + f_o \quad (4)$$

jest podwajana w nieliniowym kryształ (SHG). Jeżeli szerokość widma promieniowania laserowego jest wystarczająco duża, to zawiera mod o numerze $2n$, którego częstotliwość jest opisana wzorem:

$$f_{2n} = 2 \cdot n \cdot f_r + f_o \quad (5)$$

gdzie: f_{2n} – częstotliwość $2n$ -tej linii syntezyera częstotliwości.

Różnica częstotliwości pomiędzy zdublowaną częstotliwością modu n a częstotliwością modu $2n$ daje następujący wynik:

$$2f_n - f_{2n} = 2(f_o + nf_r) - (f_o + 2nf_r) = f_o \quad (6)$$

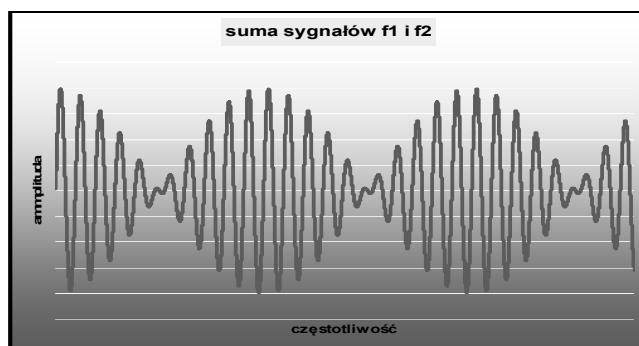
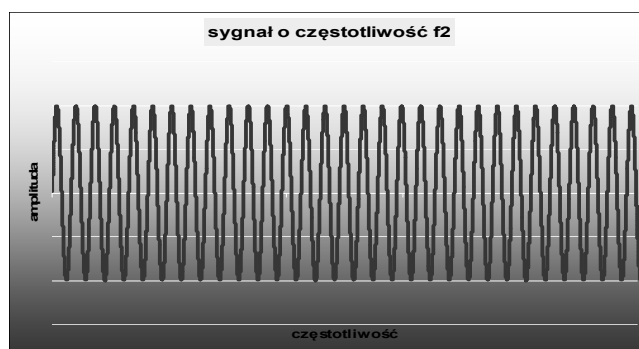
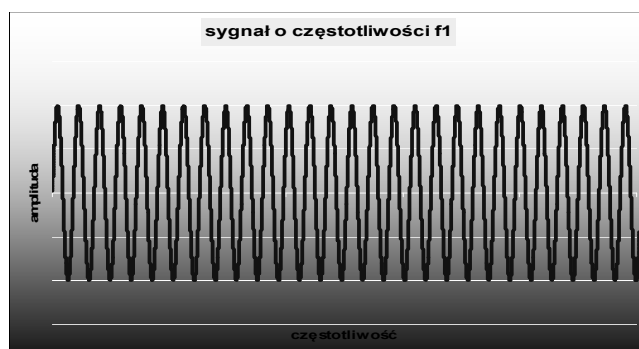
Z powyższego wzoru wynika, że częstotliwość f_o można w łatwy sposób zmierzyć, a po synchronizacji z sygnałem częstotliwości wzorcowego zegara cezowego kontrolować za pomocą mocy promieniowania optycznego lasera pompującego.

4. Przekazywanie jednostki długości

Do przekazywania jednostki długości, tj. np. wzorcowania stabilizowanych laserów metrologicznych oraz głowic interferome-

trów laserowych, stosowane jest zjawisko zdublenia optycznego (rys. 4), wykorzystujące falowy charakter światła, występujące przy nałożeniu się dwóch sygnałów promieniowania o zbliżonych częstotliwościach.

Aby wyznaczyć częstotliwość promieniowania badanego źródła światła (w tym przypadku lasera) o wartości częstotliwości rzędu kilkuset THz (wartość bezpośrednio niemierzalna) wystarczy doprowadzić do zdublenia sygnału optycznego mierzonego lasera z wzorcowym, dobrze znanym sygnałem innego, ale bardziej stabilnego generatora.



Rys. 4. Zjawisko zdublenia częstotliwości
Fig. 4. Frequency beat effect

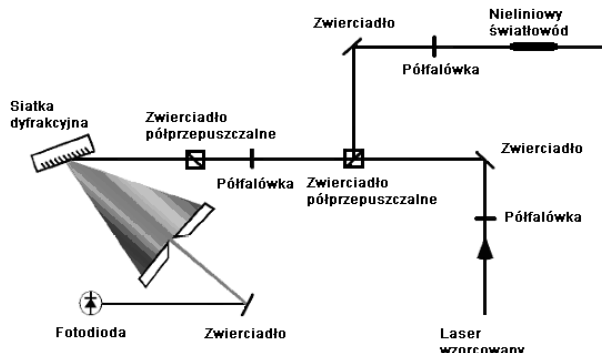
Powstaje w ten sposób sygnał o mierzalnej częstotliwości równej różnicy częstotliwości lasera badanego i wzorcowego:

$$\Delta f = f_b - f_w \quad (7)$$

gdzie: Δf – różnica częstotliwości, f_b – częstotliwość lasera wzorcowego, f_w – częstotliwość lasera badanego.

Poniżej (rys. 5) przedstawiono schemat układu pomiarowego syntezyera częstotliwości optycznych służącego do wzorcowania stabilizowanych laserów metrologicznych oraz głowic interferometrów laserowych.

Układ do zdudniania częstotliwości jest bardzo podobny do układu nieliniowego interferometru. Podobnie jak poprzednio, rolę elementu łączącego elektronikę systemu pomiarowego z układem optyczno-mechanicznym pełni fotodioda (APD).

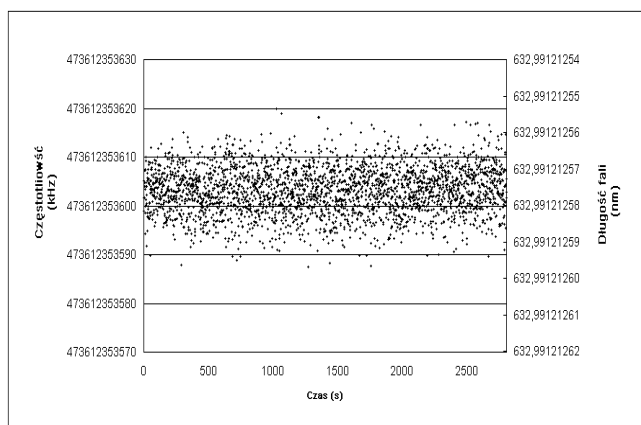


Rys. 5. Schemat układu do zdudniania częstotliwości
Fig. 5. Schematic diagram of the beat detection unit

Do wykonania wzorcowania wykorzystywane są dwie siatki dyfrakcyjne: o stałej siatki 1800 linii/mm dla przyrządów pomiarowych emitujących promieniowanie świetlne od długości fal powyżej 600 nm oraz o stałej siatki 2100 linii/mm dla długości fal poniżej 600 nm.

Wysoka stabilność pracy syntezy pozwala na wykonywanie badań długoterminowej stabilności częstotliwości (kilkę – kilkanaście godzin) laserów metrologicznych oraz głowic interferometrów laserowych.

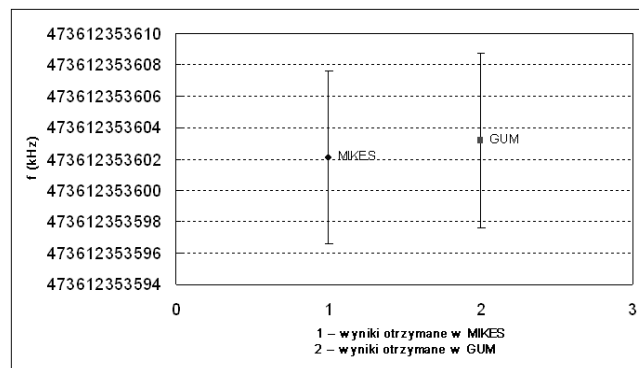
W celu sprawdzenia prawidłowości wdrożenia sytemu pomiarowego do pracy wykonano wzorcowanie lasera He-Ne stabilizowanego jodem „GUM1”. Na rysunku 6 przedstawiono przykładowe wyniki uzyskane w Głównym Urzędzie Miar.



Rys. 6. Wyniki wzorcowania lasera GUM1
Fig. 6. Results of the GUM1 laser calibration

Poniżej na rysunku 7 zestawiono wynik wzorcowania lasera „GUM1” z wykorzystaniem syntezy częstotliwości optycznych będącego własnością Głównego Urzędu Miar z wynikiem uzyskanym podczas porównań międzynarodowych w MIKES (Finlandia).

Wyniki otrzymane w Laboratorium Długości GUM są spójne z wynikami otrzymanymi w MIKES (różnica ok. 800 Hz zawarta jest w granicach niepewności). Rezultat ten potwierdza, że stowisko pracuje w prawidłowy sposób.



Rys. 7. Porównanie wyników wzorcowania lasera GUM1
Fig. 7. Comparison of the GUM1 laser calibration results

5. Podsumowanie

Z listy rekomendowanych źródeł promieniowania świetlnego najbardziej rozpowszechnione w praktyce przy realizacji jednostki długości stosowane są lasery gazowe He-Ne o długości fali promieniowania 633 nm i He-Ne o długości fali promieniowania 532 nm, lampy kadmowe ^{114}Cd (stosowane w pomiarach interferencyjnych), a obecnie najnowsze rozwiązanie – syntezery częstotliwości optycznych.

Tendencja rozwoju nowych opracowań podąża w kierunku wykorzystania i rozpowszechnienia syntezy częstotliwości w celu realizowania szerokiej gamy pomiarów wykorzystywanych w pracach badawczych instytucji metrologicznych, a dotyczących pomiarów kwantowych źródeł promieniowania oraz realizowania usług metrologicznych dla wielu dziedzin gospodarki, jak medycyna, wojsko, przemysł telekomunikacyjny, spektroskopia itp.

Modernizacja państwowego wzorca jednostki długości, czyli wdrożenie do pracy syntezy częstotliwości optycznych pozwoliła na zwiększenie możliwości pomiarowych Laboratorium Długości Zakładu Długości i Kąta GUM. Stworzona została możliwość wykonywania długoterminowych badań laserów oraz głowic interferometrów laserowych. Dzięki szerokiemu zakresowi pomiarowemu możliwe jest wykonywanie wzorcowania w kraju laserów i diod emitujących promieniowanie świetlne o długościach fal w zakresie (525 ÷ 1070) nm oraz możliwym stało się wzorcowanie laserów stabilizowanych jodem „mise en pratique”, w tym lasera wzorcowego GUM1.

6. Literatura

- [1] Documents Concerning the New Definition of the Meter. Metrologia, Nr 19, 1984.
- [2] International journal of pure and applied metrology. Metrologia, Nr 36, 1999.
- [3] Practical realization of the definition of the meter, including recommended radiations of the other optical frequency standards (2001) – international report. Metrologia, Nr 40, 2003.
- [4] The International System of Units. 1998.
- [5] Stabilized Helium-Neon Laser BIPM – Jaeger Type I250 – Operating Manual. THOMSON-CFS Division Equipments Avioniques.
- [6] Udem T., Holzwarth R., Hänsch T.: Optical frequency metrology. Nature, Nr 416, 2002.